

Mikko Kytö

Auton Kiertohitausmomentin mittauslaitteen mittaustarkkuuden arviointi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Auto- ja kuljetustekniikka

Insinöörityö

25.4.2018

Tekijä(t) Otsikko Sivumäärä Aika	Mikko Kytö Auton Kiertohitausmomentin mittauslaitteen mittauksen tarkkuuden arviointi 27 sivua + 1 liitettä 25.4.2018
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotetekniikka
Ohjaaja(t)	Projekti-insinööri Aleksi Malinen
<p>Tämän lopputyön aiheena on Metropolia Ammattikorkeakoulun Kalevankadun autolaboratoriossa käytettävän autojen kiertohitausmomentin mittauslaitteen mittauksen tarkkuuden selvittäminen ja laitteella saatujen tulosten tarkastelu. Aihe työlle syntyi Metropolialla teetetystä mittauksesta, jossa laitteella mitatut tulokset olivat ristiriitaisia teettäjän ennakoarvioiden ja muualta saamien tietojen kanssa.</p> <p>Työn tavoitteena on saada käsitys laitteen antamasta virheestä sekä tulosten vertailukelpoisuudesta muualla tehtyjen vastaavien mittausten kanssa. Työn puitteissa tehdään mittauksia useille erimallisille autoille sekä esineille, joiden hitausmomentti on tiedossa. Ennen mittauksia mittalaitteesta etsitään mahdollisia virheenaiheuttajia ja niitä korjataan mahdollisuuksien mukaan.</p> <p>Työn lopputuloksena voidaan tehtyjen mittausten perusteella todeta mittalaitteen antavan vaihtelevassa määrin liian suuria arvoja. Mittausten tulosten perusteella voidaan arvioida myös mittauskohteen ominaisuuksien vaikutusta virheen suuruuteen. Lisäksi laitteella mitattujen autojen tuloksia on vertailtu keskenään ja arvioitu autojen eri ominaisuuksien vaikutuksista autojen hitausmomentteihin.</p> <p>Työssä perehdytään myös mittalaitteen toimintaperiaatteeseen sekä hitausmomenttiin fyysisenä ja auton käsiteltävyyteen vaikuttavana suurena.</p>	
Avainsanat	hitausmomentti, auton kiertohitausmomentti, hitausmomentin mittauslaite

Author(s) Title	Mikko Kytö Defining the Accuracy of the Car Yaw Moment of Inertia Measuring Device
Number of Pages Date	27 pages + 1 appendix 25 May 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Specialisation option	Automotive Design Engineering
Instructor(s)	Aleksi Malinen, Project Engineer
<p>The purpose of this Bachelor's thesis was to study the accuracy of the car yaw moment measuring device located in the laboratory of Automotive Engineering at Metropolia University of Applied Sciences in Helsinki. The idea for this thesis came up after the device was used in a commissioned measurement and the results were contradictory with the commissioner's pre-estimations and data they had gained elsewhere.</p> <p>The goal of this thesis was to gain an approximation of the accuracy of the results gained with the device and their comparability with similar measurements carried out elsewhere. In order to perceive the size of the error of the results the device was used to measure several cars of different types and items whose yaw moment of inertia is known. Before the measurements, possible sources of errors were inspected and corrected, if possible.</p> <p>As a result of the thesis, it was found out that the results given by the measuring device were too great by a variable amount. On the basis of the data gained from the measurements it was also possible to estimate the effect of the measuring subject's attributes on the size of error of the measurements. In addition, the results of the measurements were studied and compared with one another to inspect the effect of the cars' different technical features on the cars' yaw moments of inertia</p> <p>This thesis also describes the principles of operation of the measuring device and clarifies the nature of the yaw moment of inertia as a physical property and as a feature affecting a cars' handling and driving dynamics.</p>	
Keywords	mass moment of inertia, car yaw moment of inertia, vehicle yaw moment of inertia test rig

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Hitausmomentti	1
2.1	Hitausmomentti fysiikassa	1
2.2	Hitausmomentti autotekniikassa	2
2.3	Kiertohitausmomentti auton ajodynamiikassa	4
2.4	$k^2/a \times b$ -luku ja hitaussäde	4
3	Mittalaite	6
3.1	Rakenne	6
3.2	Toimintaperiaate	7
3.3	Laskukaava	9
4	Virhetarkastelut	9
4.1	Virhetekijöiden kartoitus	9
4.2	Lisätuki	12
4.3	Satunnaisvirhe	14
5	Mittaukset	15
5.1	Vertailumittaukset	15
5.2	Lisätty momentti ja lisäpainot	16
5.3	Lisäpainojen alusta	17
5.4	Mittauksen valmistelut	18
5.5	Mitattavat autot	19
6	Mittaustulokset	19
6.1	Vertailumittaukset	19
6.2	Lisäpainojen kanssa suoritettut mittaukset	20
7	Päätelmät	24
7.1	Mittalaitteen mittatarkkuus	24
7.2	Autojen ominaisuuksien vaikutus hitausmomenttiin	25
	Lähteet	27

Lyhenteet

SAE	Society of Automotive Engineers
NTHSA	National Highway Traffic Safety Administration
VIMM	Vehicle Inertia Measuring Machine
VIMF	Vehicle Inertia Measurement Facility
DI	Dynamic Index
cg	Center of gravity, Massan keskipiste
Catia	Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive Appliquée, Dassault systemsin kehittämä 3d - maalinnusohjelma

1 Johdanto

Auton kiertohitausmomentilla mitataan auton taipumusta lähteä pystysuoran akselin ympäri tapahtuvaan kiertyvään liikkeeseen ja sitä, kuinka helposti tämä liike on mahdollista pysäyttää. Luku on olennainen auton kaarrekäyttäytymistä tai vakautta tutkittaessa, ja sillä on käyttönsä myös turvallisuus- sekä onnettomuustutkinnassa [1].

Metropolian Kalevankadun Autolaboratoriossa sijaitsevalla autojen kiertohitausmomentin mittaamiseen tarkoitetulla laitteella teetettiin syksyllä 2015 mittaukset Porsche 911 Carreralle. Mittauksen tilaaja kuitenkin kyseenalaisti saatujen mittaustulosten paikkansapitävyyden epäillen niiden olevan liian suuria todellisiin lukuihin nähden. Tässä insinööriyössä tarkastellaan mittalaitteella saatuja tuloksia ja arvioidaan laitteen antaman virheen suuruutta.

Tulosten tarkkuuden selvittämiseksi laitteen antamia tuloksia vertailtiin muualla tehtyihin mittauksiin ja laitteella mitattiin esineitä, joiden hitausmomentti on laskettavissa laskukaavoilla. Myös mahdollisia virheenaiheuttajia arvioitiin ja korjattiin mahdollisuuksien mukaan.

Työn aikana laitteella mitattiin useampia autoja. Mitattaviksi autoiksi valittiin mahdollisimman paljon erityyppisiä autoja, jotta voitiin arvioida ja vertailla erilaisten teknisten ratkaisujen vaikutuksia auton hitausmomenttiin ja siitä laskettavissa oleviin hitaussäteeseen ja k^2/axb lukuun.

2 Hitausmomentti

2.1 Hitausmomentti fysiikassa

Hitausmomentti (J) eli inertiamomentti on fysikaalinen suure, jolla mitataan pyörivän kappaleen hitautta eli kykyä vastustaa liiketilan muutoksia. Mitä suurempi hitausmomentti kappaleella on, sitä suurempi vääntömomentti tarvitaan, jotta se saataisiin kiihtymään tietyllä kulmakiihtyvyydellä. Hitausmomentti vastaa monin puolin etenevän liik-

keen massaa [2]. Hitausmomentin mittaaminen on kuitenkin massan mittaamista monimutkaisempaa. Monille vakioituille kappaleille on olemassa omat laskukaavansa, joiden avulla momentti voidaan laskea mittojen ja massan perusteella, mutta monimutkaisemmille kappaleille laskukaavan laatiminen olisi kuitenkin haastavaa ja yksilöllistä. Kokeellisen määrittelyn lisäksi monimutkaisten kappaleiden hitausmomentin mittaamiseen voidaan nykyisin käyttää simulointiohjelmia. Nämä kuitenkin vaativat tarkan 3D-mallin mitattavasta kappaleesta.

Hitausmomentti määritetään aina jonkin tietyn pyörimisakselin suhteen, ja saman epäsymmetrisen kappaleen eri akselien suhteen lasketut momentit ovat erisuuruisia. Hitausmomentti on myös ns. additiivinen suure, eli saman pyörimisakselin ympäri mitatut momentit voi laskea yhteen tai vähentää toisistaan. Yleisesti ottaen hitausmomentti on aina sitä suurempi, mitä kauempana pyörimisakselista suurin osa kappaleen massasta sijaitsee. Jos haluttu pyörimisakseli ei kulje kappaleen massakeskipisteen läpi, täytyy se ottaa laskettaessa huomioon käyttämällä ns. Steinerin sääntöä [3]:

$$J_B = J_A + m \times r^2$$

Tämän kaavan ehtona on, että haluttu pyörimisakseli B on yhdensuuntainen sen massakeskipisteen halki kulkevan akselin A kanssa, jonka suhteen kappaleen oma hitausmomentti on laskettu.

2.2 Hitausmomentti autotekniikassa

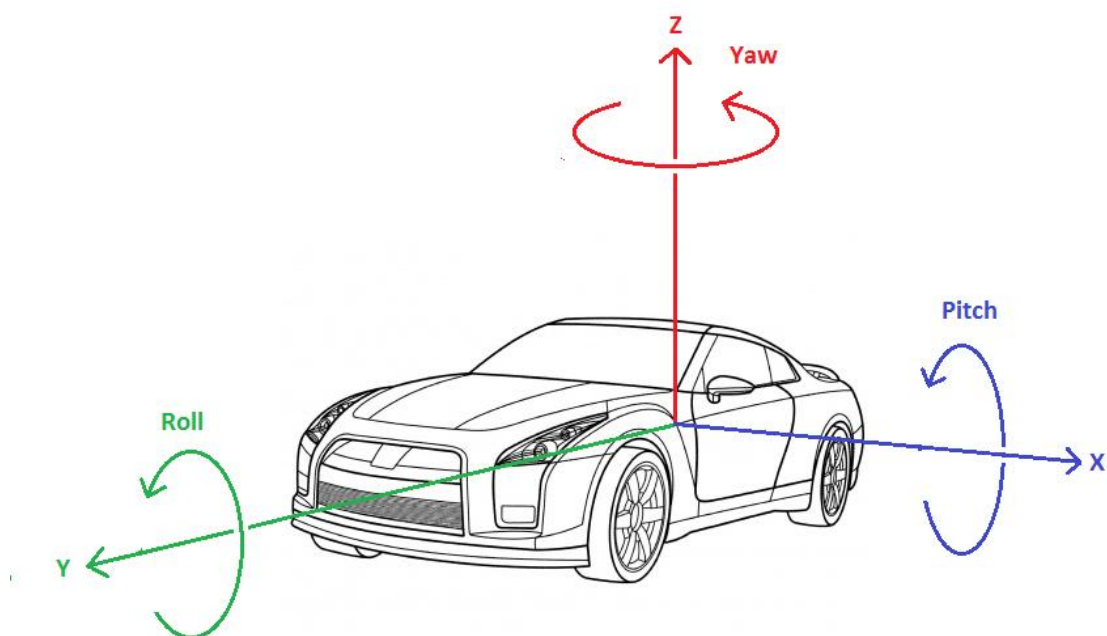
Hitausmomentti liittyy olennaisesti moniin auton voimansiirron ratkaisuihin, mutta koko auton hitausmomentilla on merkitystä lähinnä auton käsiteltävyyteen ja ajodynamiikkaan vaikuttavana tekijänä. Kuten muillekin kappaleille auton hitausmomentti voidaan määrittää useamman erisuuntaisen pyörimisakselin suhteen. Pääasiassa käytetään auton massakeskipisteeseen sijoitetun XYZ-koordinaatiston mukaisia poikittais-, pitkitäis- ja korkeusakseleita (kuva 1).

Autoon nähden poikittaisen akselin ympäri tapahtuvaa liikettä kutustaan nyökkimiseksi (pitch). Tämän suuntainen hitausmomentti vaikuttaa tien pinnan herätteiden aikaansaamaan jousituksen pituussuuntaiseen värähtelyyn sekä auton taipumukseen nostaa

tai laskea perää ja keulaa lähinnä tilanteissa, joissa tapahtuu dynaamista painonsiirtoa, eli kovissa kiihdytyksissä tai jarrutuksissa [1].

Auton suhteen pitkittäisen akselin ympäri tapahtuvaa liikettä kutsutaan kallistumiseksi (roll). Tämän akselin suhteen lasketun hitausmomentin avulla voidaan tutkia auton kaa-
tumisherkkyyttä sekä alustan reagointia kallistukseen [4].

Autoon nähden pystysuoran akselin ympäri tapahtuvaa liikettä kutustaan kierroksi (yaw). Kiertävää pyörimisliikettä esiintyy aina auton kääntyessä ja kiertohitausmomentin suuruus kertoo osaltaan kuinka paljon auto vastustaa suunnanmuutosta [4].



Kuva 1. Auton kierto-, nyökkimis- ja kallistusakselit

Metropolian mittalaitteella voidaan mitata vain kiertohitausmomenttia, joten työssä keskityttiin lähinnä sen tutkimiseen. Nykyaikaisilla, ammattikäyttöön varta vasten valmistetuilla laitteilla voidaan kuitenkin saman mittauksen aikana mitata hitausmomentit kaikkien kolmen akselin suhteen [5].

2.3 Kiertohitausmomentti auton ajodynamiikassa

Auton ajaessa mutkaan sen tekemä liike voidaan jakaa pyörivään ja etenevään liikkeeseen: auto liikkuu kaarevalla radalla mutkan läpi, minkä lisäksi auton runko pyörii siten, että keula on mutkan jälkeen jälleen menosuunnassa. Pyörimisliikkeen aikaansaamiseen tarvittava kulmakiihtyvyys saadaan aikaan kääntyvien renkaiden aiheuttamilla sivuttaisvoimilla [6]. Auton kiertohitausmomentti määrittää, kuinka paljon sivuttaisvoimia tarvitaan tavoitellun kulmakiihtyvyyden aikaansaamiseksi. Suuremman kiertohitausmomentin omaava auton vaatii suuremman sivuttaisvoiman ja tätä kautta suuremmat renkaiden sortokulmat, jotta se saadaan pyörivään liikkeeseen. Hitausmomentti vaikuttaa myös saavutetun kulmanopeuden hidastumiseen, millä on vaikutusta esimerkiksi ajettaessa kahteen peräkkäiseen erisuuntaiseen mutkaan, jolloin edellisen mutkan suuntainen pyörimisliike on saatava pysähtymään, ennen kuin kääntyminen vastakkaiseen suuntaan voi alkaa.

Kiertohitauteen kuten muihinkin auton ominaisuuksiin liittyy auton suunnittelutyössä tärkeitä kompromisseja. Perheautoissa mukavuus ja käytännöllisyys menevät yleensä optimaalisen ajettavuuden edelle. Sisätilojen maksimointi vaatii auton voimanlinjan paketoimista mahdollisimman pieneen tilaan, yleensä kauas auton keskiosasta, mikä kasvattaa auton hitausmomenttia. Auton kaarrekäyttäytymiseen voidaan vaikuttaa suuresti myös oikeilla jousitus- ja alustaratkaisuilla sekä rengastuksella, jotka vaativat pienempiä kompromisseja ja ovat helpommin säädettävissä myös varsinaisen suunnittelutyön jälkeen. Toisaalta kiertohitauten minimointi on olennainen osa suunnittelutyötä urheilu- ja kilpa-autoissa, joissa kaikki käsiteltävyyttä parantavat seikat on otettava alusta asti huomioon mahdollisimman hyvän suorituskyvyn aikaansaamiseksi [7].

2.4 k^2/axb -luku ja hitaussäde

Kiertohitausmomentti siis vaikuttaa osaltaan auton ”ketteryteen” ja pienen kiertohitausmomentin omaavia autoja pidetäänkin yleisesti urheilullisina ja hyvin ohjautuvina. Kiertohitausmomentin minimoiminen on myös yksi syy miksi suurin osa urheilu- ja kilpa-autoista on keskimoottorisia.

Auton kiertohitausmomentti on kuitenkin sellaisenaan melko vertailukelvoton suure. Se ei ota huomioon auton painopisteen tai pyörien sijoittelua, eikä se yksinään kerro paljoa

auton ajo-ominaisuuksista. Käytännössä auton liikkeessä radalla pyörimisliike ei yleensä tapahdu auton massakeskipisteen vaan erillisen kiertymäpisteen ympäri. Tämän pisteen sijaintia ja auton kaarreajo-ominaisuuksia simuloidaan usein erillisen DI-indeksiluvun eli k^2/axb -luvun avulla.

Tämän luvun avulla voidaan pelkästään massasta aiheutuva hitaus jättää vertailematta ja keskittyä auton sisäisen painojakauman sekä pyörien ja painopisteen sijoittelun vaikutukseen. Massan jakautuminen auton sisällä määritetään laskemalla auton hitaussäde (k). Hitaussäteellä voidaan kuvata massan keskimääräistä etäisyyttä pyörimisakselista ja se määritetään laskemalla massan ja pyörimisakselin välisen etäisyyden neliöllinen keskiarvo [8]. Se on laskettavissa myös hitausmomentista kaavalla.

$$k = \sqrt{\frac{J}{m}}$$

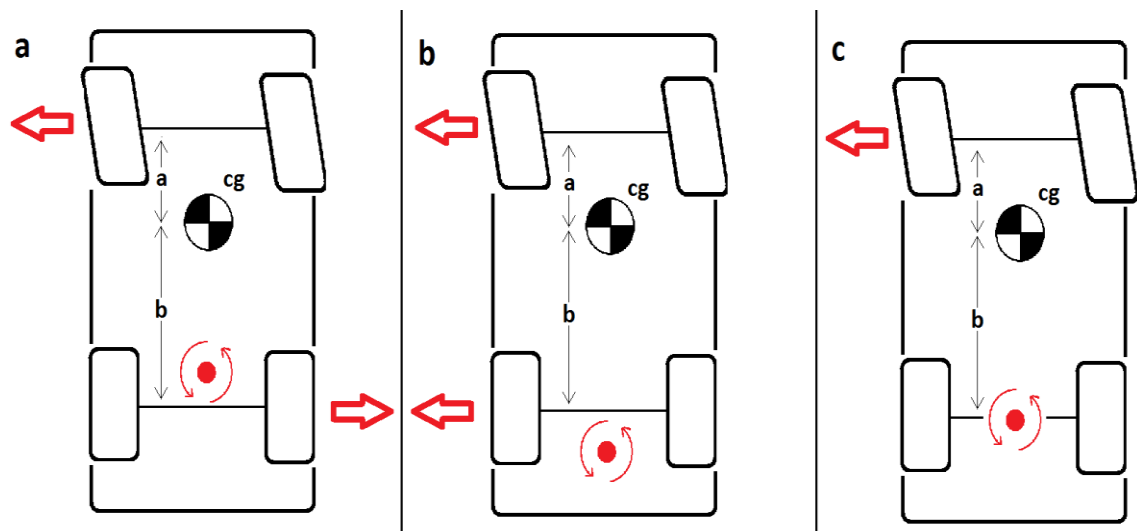
Hitaussäteen lisäksi Indeksiluku ottaa huomioon akselien etäisyydet auton painopisteestä (a,b), millä määritetään renkaiden tuottamien sivuttaisvoimien saamien vipuvarsien pituus.

k^2/axb -luvun avulla erimallisten autojen ominaisuuksia voidaan vertailla keskenään, vaikka autojen rakenteet poikkeaisivat suuresti toisistaan. Luvun ollessa yhtä pienempi auton kiertymäpiste asettuu auton taka-akselin etupuolelle (kuva 2 a). Tällöin etupyörien tuottamien sivuttaisvoimien auton runkoon aiheuttama momentti ohjaa takapyöriä vastakkaiseen suuntaan. Tämän seurauksena takarenkaiden sivuttaisvoimat ja sortokulmat kasvavat, jolloin koko auton sortokulma voi olla suurempi, mikä nopeuttaa auton kääntymistä. [4] Rengaspidon rajoilla ajettaessa takarenkaiden suuremmat sortokulmat alkavat kuitenkin rajoittaa takarenkaiden tuottamia sivuttaisvoimia, mikä saattaa johtaa takarenkaiden pidon menettämiseen ja tahattomaan pyörähdykseen [9].

Luvun ollessa yhtä suurempi kiertymäpiste sijaitsee taka-akselin takana (kuva 2 b). Tällöin eturenkaiden sivuttaisvoimat aiheuttavat mutkan alussa takarenkaisiin samansuuntaisia sivuttaisvoimia. Auton kulmanopeuden kertyessä takapyörien sivuttaisvoimat kääntyvät kuitenkin vastakkaisen suuntaisiksi. Takarenkaisiin kohdistuvat sivuttaisvoimat ovat silti kauttaaltaan pienemmät kuin pienemmän Indeksiluvun omaavissa autoissa ja tällöin myös takarenkaiden sortokulmat pysyvät alhaisina. Näin auton taka-akseli luistaa vähemmän sivusuunnassa, jolloin auto on vakaampi, muttei reagoi ohjaukseen yhtä nopeasti [6]. Suuren indeksiluvun omaavissa autoissa takarenkaiden si-

vuttaisvoimien suunnanmuutos saattaa kuitenkin saada auton peräosan tuntumaan levottomalta [4].

Autoa, jossa indeksiluku on tasan 1, pidetään usein ideaalisena ajettavana. Tällöin Kiertymispiste sijaitsee taka-akselin kohdalla (kuva 2 c), ja etuakselin sivuttaisvoimat kohdistuvat auton iskemäpisteeseen (point of percussion), jolloin etupyörien sivuttaisvoimat eivät aiheuta taka-akselille kummankaan suuntaisia sivuttaisvoimia, vaan ne syntyvät vasta kun auton kulmanopeus kasvaa [4].



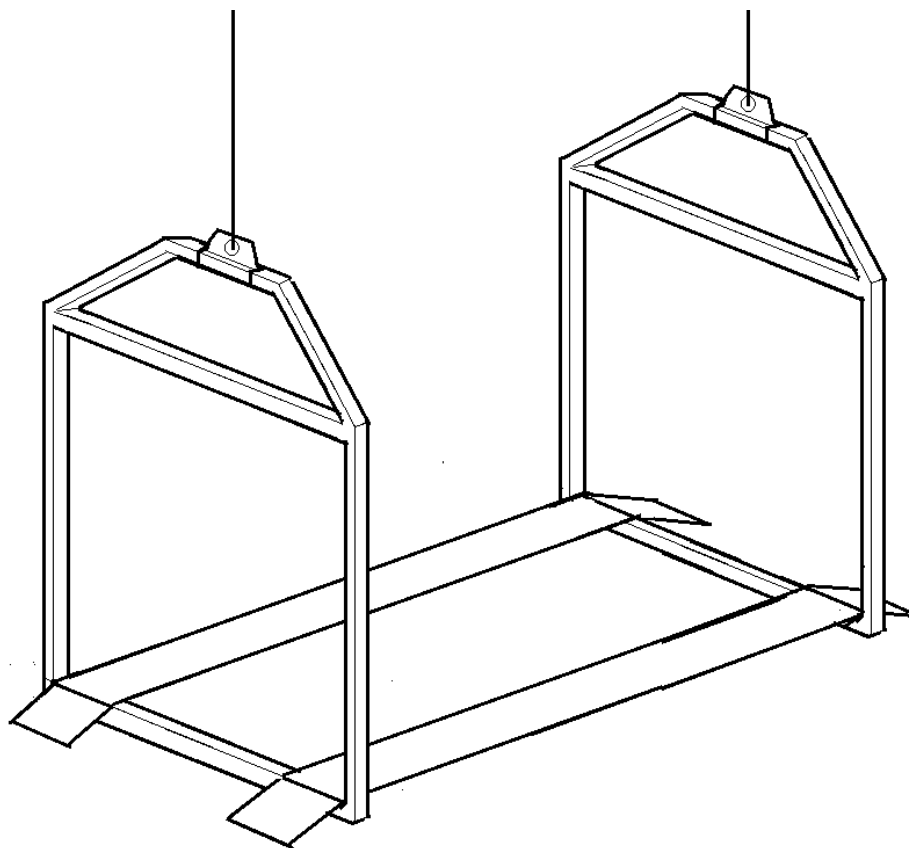
Kuva 2. Kiertymäpisteen sijainnin vaikutus takapyörien sivuttaisvoimiin, kun $k^2/axb < 1$ (a), $k^2/axb > 1$ (b), $k^2/axb = 1$ (c)

3 Mittalaite

3.1 Rakenne

Metropolian autolaboratoriossa käytettävä mittalaite on rakennettu Helsingin teknillisen oppilaitoksen tilaamana opinnäytetyönä vuonna 1991. Käytännössä laite koostuu kahden vaijerin varassa riippuvasta kehikosta, jonka alaosassa on ajorampit mitattavaa autoa varten (kuva 3). Laite on suunniteltu purettavaksi ja ajorampit ja päätykappaleet ovat helposti irrotettavissa toisistaan säilytystä varten. Laitetta on käytetty lähinnä opetustarkoitukseen ja ajoittain tilauksesta oppilaitoksen ulkopuolissa mittauksissa. Laitteen mittatarkkuuden arvioinnista ei ole dokumentteja sen valmistumisen jälkeen, ei-

vätkä lopputyössäkään mitatut autot vastanneet täysin muualla mitattuja vertailukohteitaan. [10]



Kuva 3. Metropolian mittalaite: ajosillat, päätykappaleet ja kiinnitysvaijerit

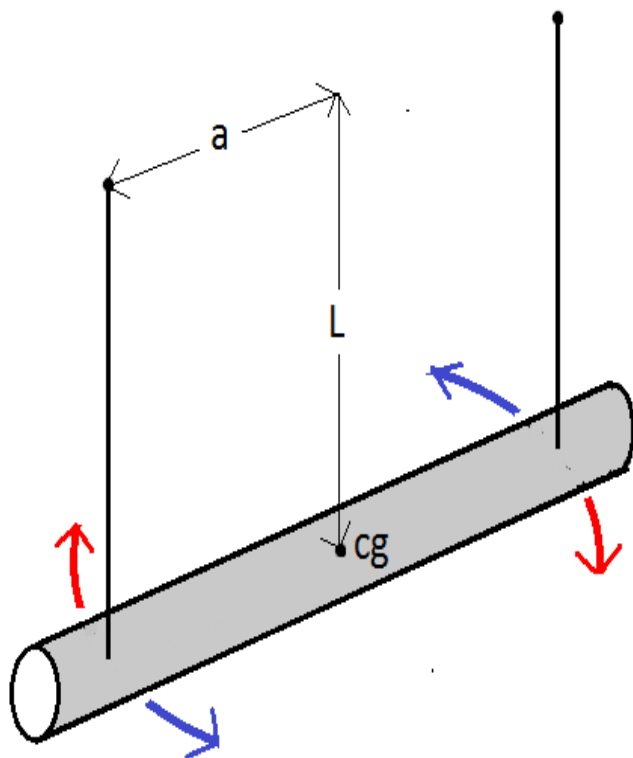
Samankaltaisia mittalaitteita on rakennettu myös muiden oppilaitosten ja autovalmistajien toimesta, joskin autoja mitattaessa on muualla suosittu lähinnä kolmilankaheiluriin perustuvaa ratkaisua, joka on kaksilankaista vakaampi [11]. Metropolian tapauksessa tämä toteutus ei olisi onnistunut, koska mittalaite oli alun perinkin tarkoitettu sijoittaa autolaboratorioon, missä tilan puute tekee kolmilankaisten ratkaisun mahdottomaksi. Nykyään simulointiohjelmien kehitys on vähentänyt fyysisen mittauksen tarvetta, ja ammattikäytössä heiluriin perustuvat laitteet ovat korvautuneet automatisoiduilla, laakeroituun alustaan perustuvilla ratkaisuilla.

3.2 Toimintaperiaate

Mittalaitteen toiminta perustuu kaksilankaisten heilurin periaatteeseen, jonka avulla kappaleen hitausmomentti voidaan määrittää edestakaiseen kiertoliikkeeseen saatetun

kappaleen taajuudesta. Menetelmä on yleisesti käytössä, kun halutaan määrittää hitausmomentti muodoltaan monimutkaiselle kappaleelle, jonka hitausmomentti ei ole laskettavissa analyttisesti laskukaavoilla. Useimmissa tapauksissa mitattavat esineet ovat kuitenkin pienikokoisia tai pienoismalleja isommista esineistä. [12]

Mittaustilanteessa kahdesta kohdasta narulla ripustettu esine poikkeutetaan tasapainoasemastaan vetämällä kappaleen päitä eri suuntiin, siten että vapautettaessa se alkaa pyörähdellä edes takaisin vaakatason massakeskipisteensä ympäri (kuva 4). Mitattaessa on tärkeää, että kappaleen keskipiste on yhtä etäällä kummastakin langasta. Hyvin onnistuneessa mittauksessa tämän keskipisteen tulisi myös pysyä alustaan nähden mahdollisimman samalla kohtaa.



Kuva 4. Kaksoislankaheilurin mittausasetelma

Autoa mitattaessa ripustusvaijereita ei voida kiinnittää suoraan autoon, vaan tarvitaan erillinen mittalaite. Tällöin tulokseksi saatuun hitausmomenttiin sisältyy kuitenkin myös mittalaitteen hitausmomentti. Kun auto sijoitetaan mittalaitteeseen siten, että sen massakeskipiste on laitteen keskellä eli sen massakeskipisteessä kulkee tällöin pystysuora

pyörimisakseli molempien massakeskipisteiden läpi, jolloin voidaan tyhjälle mittalaitteelle laskettu hitausmomentti vähentää koko systeemin momentista ja selvittää näin auton kiertohitausmomentti.

3.3 Laskukaava

Kun lankojen pituus, niiden välinen etäisyys sekä mitattavan kappaleen massa on tiedossa, voidaan mitattavan kappaleen heilahdusajasta laskea kappaleen hitausmomentti kaavalla.

$$J = \frac{m \times a^2 \times T^2 \times g}{4 \times l \times \pi^2}$$

Kaava perustuu painovoiman poikkeutetun kappaleen päihin aiheuttamien sivuttaisvoimien ratkaisemiseen trigonometrisesti. Kaavaa on kuitenkin yksinkertaistettu jättämällä voimien sini- ja cosinifunktiot huomioimatta pienen kulman approksimaatiota käyttäen. Tämän vuoksi kaavalla lasketut tulokset ovat luotettavia vain kun poikkeutuskulmat ovat pieniä [12]. Auton painoista esinettä mitattaessa auton massa estää liian suuren poikkeutuskulman käyttämisen.

Sijoittamalla hitaussäde laskukaavaan voidaan todeta laitteen heilahdusajan T riippuvan laitteen ominaisuuksien lisäksi vain mitattavan kappaleen hitaussäteestä.

$$T = \sqrt{\frac{k^2 \times l \times 4\pi^2}{g \times a^2}}$$

4 Virhetarkastelut

4.1 Virhetekijöiden kartoitus

Ennen varsinaisten mittausten aloittamista pyrittiin mittalaitteesta ja -menetelmistä havaitsemaan potentiaaliset virheen aiheuttajat. Opinnäytetyön kannalta olennaisemmassa osassa oli laitteen systemaattinen virhe, eli kuinka kaukana sen antamat tulokset olivat todellisista arvoista.

Jo opinnäytetyötä edeltäneissä Metropolialla teetetyissä mittauksissa oli kiinnitetty huomiota mittalaitteen korkeisiin päätykappaleisiin, joiden yläpäihin katosta laskeutuvat kiinnitysvaijerit kiinnitetään. Päätykappaleiden arveltiin pääsevän heilumaan puolelta toiselle alustan keinahdellessa ja näin niiden toimivan tavallaan kiinnitysvaijerien jatkona. Laskentakaavassa oletetaan mitattava kappale täysin jäykäksi sekä kiinnitysvaijerit joustamattomaksi, joten kaikki välitys tai taipuminen mittalaitteen kehikossa on epätoivottua. Kolmilankaisen heilurin tapauksessa vaijerit olisi voitu kiinnittää alemmas, mutta kaksilankaisessa mallissa kiinnityskohtien on riittävän vakauden aikaansaamiseksi sijaittava reilusti mitattavan esineen painopisteen yläpuolella.

Pitkä etäisyys vaijerien kiinnityspisteistä mitattavan systeemin massakeskipisteeseen luo myös laitteeseen jäykän varren, joka saattaa tuoda laitteeseen kaksoisheilurin piirteitä. Vaijerien kiinnittäminen kehikkoon ja katon kiinnityslenkkeihin koukuilla aiheuttaa vaijerien päihin nivelet, jotka osaltaan muuttavat keinuvan laitteen käytöstä kiinteästi liitettyyn vaijeriin nähden. Myös mittalaitteen keskipisteen epätoivottu liike mittaustilanteessa katsottiin virheen aiheuttajaksi, joskin liikkeen määrä vaihteli eri mittauskertojen välillä. Näihin epäkohtiin ei kuitenkaan puututtu, sillä niiden aiheuttaman virheen arviointi oli hyvin vaikeaa ja niiden korjaaminen olisi vaatinut muutostöitä autolaboratorion lattia- ja kattorakenteisiin sekä vaikeuttanut mittalaitteen kokoamista.

Auton jousituksen aiheuttaman värähtelyn epäiltiin myös vaikuttavan mittaustuloksiin, minkä vuoksi kahdelle työssä mitattavalle autolle tehtiin mittaukset myös tunkeilla tuettuina. Tunkeilla tuetun ja vapaasti joustavan auton mittaustuloksen ero oli kuitenkin häviävän pieni, pienempi kuin muille mittauksille mitattu satunnaisvirhe. Jousituksen aiheuttaman virheen voitiin todeta katoavan mittausten satunnaisvirheisiin eikä sillä näin ollen katsottu olevan merkitystä laitteen systemaattiseen tarkkuuteen.

Mittausmenetelmää tutkittiin myös suurentamalla laitteen poikkeutuskulmaa ja lisäämällä ajastettavien heilahdusamplitudien määrää, mutta näillä keinon saatu muutos heilahdusaikaan oli merkityksettömän pieni, mikä kertoo laitteen toimivan pitkälti normaalin heiluriliikkeen periaatteiden mukaisesti.

Mittalaitteen kehikon mahdollinen vääntyileminen arvioitiin keskeiseksi virhetekijäksi ja sen korjaaminen työn puitteissa mahdolliseksi. Kehikon jäykkyyden tutkimiseen ei keksitty absoluuttista mittausmenetelmää ja yleiskuvan saamiseksi päädyttiin ratkaisuun,

jossa kehikon toiseen päätykappaleeseen kiinnitettiin laserosoitin ja toiseen mitta-asteikko sekä videokamera kuvaamaan valopisteen liikettä asteikolla (kuva 5). Tämän järjestelyn kanssa laitetta käytettäessä valopisteen voitiin havaita liikkuvan useita senttimetrejä sekä vaaka- että korkeussuunnassa. Pisteen liike oli suurinta, kun asteikko oli kiinnitettynä päätykappaleen ylimpään kohtaan, lähelle vaijerin kiinnityskohtaa. Tällä mittaussuunnalla voitiin todeta päätykappaleiden taipuvan toisiinsa nähden useita senttimetrejä poikittaissuunnassa sekä keinuvan myös jossain määrin kehikon pituussuunnassa.

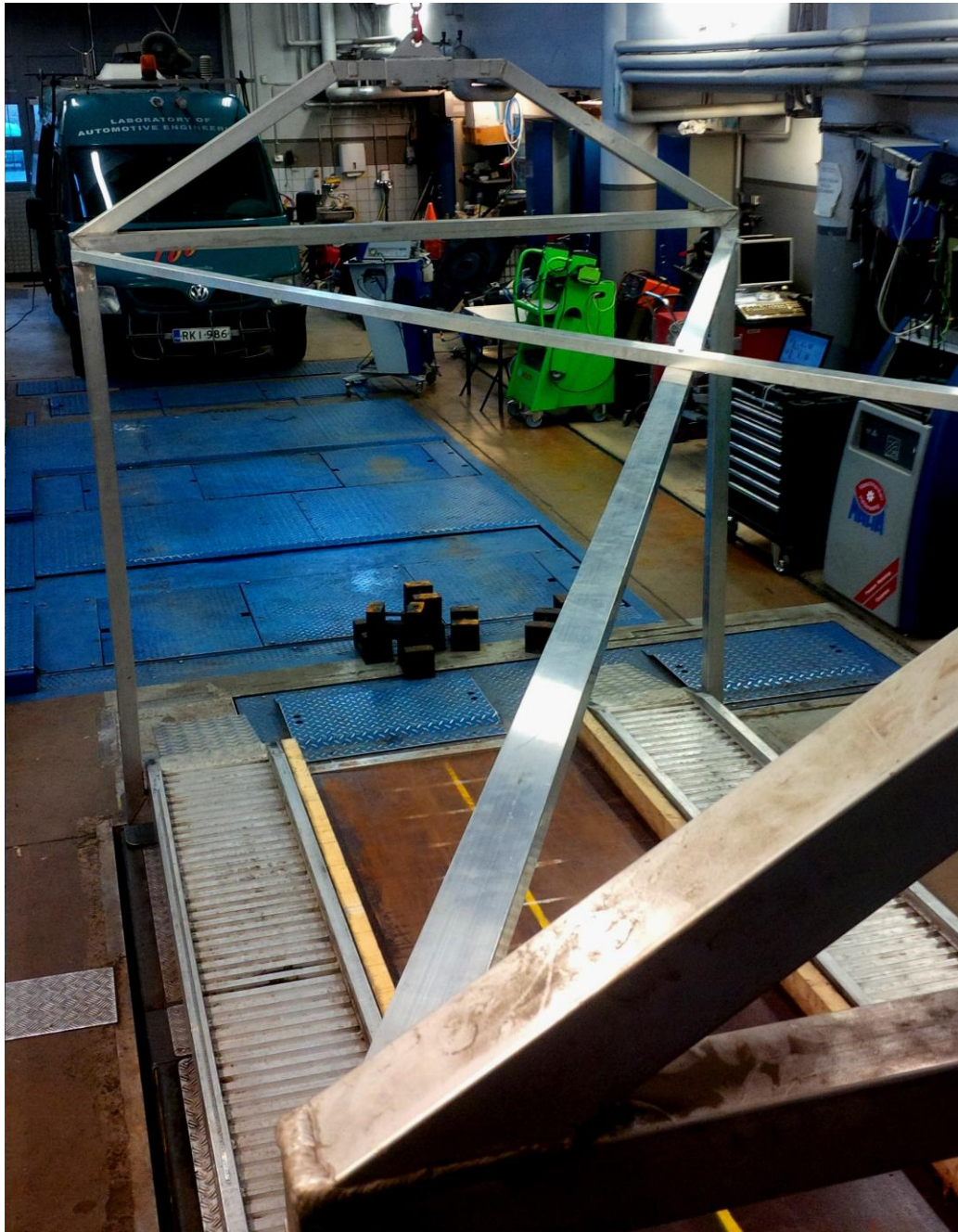


Kuva 5. Päätykappaleiden taipumisen arviointimenetelmä: laserosoitin ja mitta-asteikko

4.2 Lisätuki

Päätykappaleiden poikittaissuuntaisen heilumisen poistamiseksi päätettiin laitteen yläosaan lisätä ylimääräinen lisätuki. Eniten poikittaissuuntaista jäykkyyttä lisääväksi rakenteeksi todettiin ristikkäistuki ja tuen tuoman lisäpainon pitämiseksi mahdollisimman pienenä valittiin tuen materiaaliksi muun mittalaitteen tapaan alumiini. Tukiin vaikuttavia voimia tutkittaessa havaittiin tukeen kohdistuvan pääosin puristavaa ja vetävää kuormitusta. Taivuttavan rasituksen jäädessä vähäiseksi, voitiin tukien profiiliksi valita varsin kevyt 50 x 30 x 2,5 mm.

Ristikko toteutettiin kahdella laitteen suhteen viistottain asetetulla alumiiniprofiililla (kuva 6). Tukien kiinnittämiseksi laitteen päätykappaleisiin kiinnitettiin erilliset kiinnikkeet käyttäen kaarihitsausta. Profiilit asetettiin kulkemaan hieman eri tasoon, jolloin tuet olivat laitteen keskellä päällekkäin. Tällä ratkaisulla välttyttiin tekemästä monimutkaista liitoskappaletta profiilien yhtymiskohtaan, jolloin voitiin myös käyttää profiililtaan pienempiä ja kevyempiä tukia. Pituussuuntaisen heilumisen estämiseksi samanlaisia tukia harkittiin myös laitteen sivuseinämiin, mutta niitä ei toteutettu ylimääräisen painon välttämiseksi ja koska auton sivussa olevat tuet olisivat hankaloittaneet mittalaitteen käyttöä. Tuet olisi pitänyt lisätä laitteen molemmille puolille mittalaitteen massakeskipisteen säilyttämiseksi laitteen keskellä.



Kuva 6. Mittalaitteen yläosan lisätuki

Ristikkotuen lisäämisen jälkeen päätykappaleiden poikittainen liike oli poistunut lähes kokonaan ja myös pituussuuntainen heilunta oli vähentynyt jonkin verran. Mittalaitteen oma hitausmomentti kasvoi lisätuen ja laitteen alaosaan rakennetun vanerialustan myötä n. $630 \text{ kg} \times \text{m}^2$:stä n. $680 \text{ kg} \times \text{m}^2$:iin, mikä on hyvin vähän lisätyn materiaalin massaan ja mittoihin verrattuna. Todennäköisesti jäykempi rekenne kompensoi laitteen kasvanutta hitausmomenttia. Suoritettaessa hitausmomenttimittaus samalle autolle

ilman tukea ja sen kanssa, tuen kanssa saatu tulos oli mitattavasta autosta riippuen 5 - 10 % pienempi, suhteellisen eron ollessa suurempi kevyillä ja pienen hitausmomentin omaavilla autoilla (taulukko 1).

Taulukko 1. Lisätuen vaikutus mitattuun hitausmomenttiin

Auto	Chrysler	Toyota
Hitausmomentti ilman lisätukea ($\text{kg}\times\text{m}^2$)	2441	1691
Hitausmomentti lisätuki kiinnitettynä ($\text{kg}\times\text{m}^2$)	2285	1522

4.3 Satunnaisvirhe

Vaikka työssä keskityttiin pääasiassa mittalaitteen systemaattisen virheen hahmottamiseen, tutkittiin myös mittausmenetelmän satunnaisvirheitä eli mittausten toistettavuutta. Mittausmenetelmä on kokonaisuudessaan varsin monivaiheinen, ja siinä on useampia kohtia, joihin vaikuttavat esimerkiksi mittaajien reaktioaika sekä arviointikyky. Satunnaisvirheiden kannalta olennaisia vaiheita ovat auton ja mittalaitteen painopisteiden sijoittaminen samalle kohdalle, mittalaitteen poikkeuttaminen ja yhtäaikaan vapauttaminen sekä ajanoton aloittaminen ja katkaiseminen. Lisäksi mittaajien on arvioitava ja tarvittaessa hylättävä karkeana virheenä mittaukset, joissa mittalaite alkaa heilahdella epäkeskeisesti.

Ajanottoon ja auton sijoitteluun liittyvien satunnaisvirheiden suuruutta selvitettiin toistomittauksilla. Ajanoton käynnistämisen ja katkaisemisen satunnaisvirhettä voitiin arvioida laskemalla mitattujen heilahdusaikojen vaihteluväli. Mittauksen toistettavuutta tutkittiin vaihtamalla ajanottajaa ja mittalaitetta poikkeuttaneita henkilöitä keskenään. Auton sijoittamisen epätarkkuudesta aiheutuvaa satunnaisvirhettä arvioitiin liikuttelemalla autoa mittausten välissä, jolloin auton painopiste jouduttiin säätämään uudelleen mittalaitteen keskelle.

Mittaukseen käytetyt mittausvälineet ovat mittanauha, sekuntikello sekä auton punnitsemiseen käytetyt kulmapainovaa'at. Mittausvälineille ei löydetty valmistajan ilmoittamaa tarkkuutta, joten kunkin mittavälineen epätarkkuuden oletettiin olevan puolet laitteen lukemataarkkuudesta (taulukko 2). Ajanoton käynnistymisen ja katkaisemisen epätarkkuudeksi valittiin viidelle heilahdussarjalle laskettu suurin vaihteluväli 0,23 s, johon

lisättiin suurin auton uudelleen sijoittamisesta aiheutunut ero 0,012 s, suurin ajan ottajan vaihtamisesta aiheutunut ero 0,032 s sekä sekuntikellon epätarkkuus 0,005 s. Näistä laskettiin ajanotolle suurin mahdollinen epätarkkuus 0,279 s eli 0,0558 s/heilahdus.

Taulukko 2. Käytetyt mittavälineet tarkkuuksineen

Mittalaite	Lukemataarkkuus	Virhe
Sekuntikello	0,01 s	$\pm 0,005$ s
Mittanauha	0,001 m	$\pm 0,0005$ m
Kulmapainovaaka	0,5 kg ($\times 4$)	$\pm 0,25$ kg ($\times 4$)

tunnetuista epätarkkuuksista laskettiin virheen etenemislain mukaan suurin mahdollinen lopputulokseen aiheutuva epätarkkuus. Virhe laskettiin ensin tyhjän mittalaitteen ja suurimman eli BMW:n hitausmomentin laskutoimituksille ja sen jälkeen auton painopisteen määrittävälle tasapainoyhtälölle. Näistä epätarkkuuksista voitiin Steinerin lauseen avulla laskea koko mittauksen maksimiepätarkkuudeksi ± 146 kg \times m².

5 Mittaukset

5.1 Vertailumittaukset

Yleiskuva laitteen antamien tulosten todenmukaisuudesta haluttiin ensin muodostaa mittaamalla autoja, joiden hitausmomentti on mitattu jossain muualla kehittyneemmällä laitteistolla. Autojen hitausmomentit eivät kuitenkaan kuulu yleiseen tietouteen jaettuihin autojen teknisiin tietoihin, ja selvisi nopeasti, ettei niiden saamien opinnäytetyön kaltaiseen tutkimukseen onnistu virallista tietä valmistajien tai maahantuojien kautta. Myöskään oppilaitokset, joissa käytettiin kaupallisesti valmistettuja laitteistoja, eivät saaneet luovuttaa niissä teetettyjen mittauksien tuloksia ulkopuolisille. Saksalaiselta Aachenin yliopistolta saatiin kuitenkin tiedot heidän VIMM-laitteellaan mitatun 1. sukupolven Mercedes Benz A-mallin hitausmomenteista, minkä lisäksi yhdysvaltalaisen SAE:n arkistosta löytyi NTHSA:n tekemä tutkimus autojen kaatumisherkkyydestä, jonka yhteydessä oli mitattu myös testiautojen (lähinnä 80- ja 90-luvun amerikkalaisia mal-

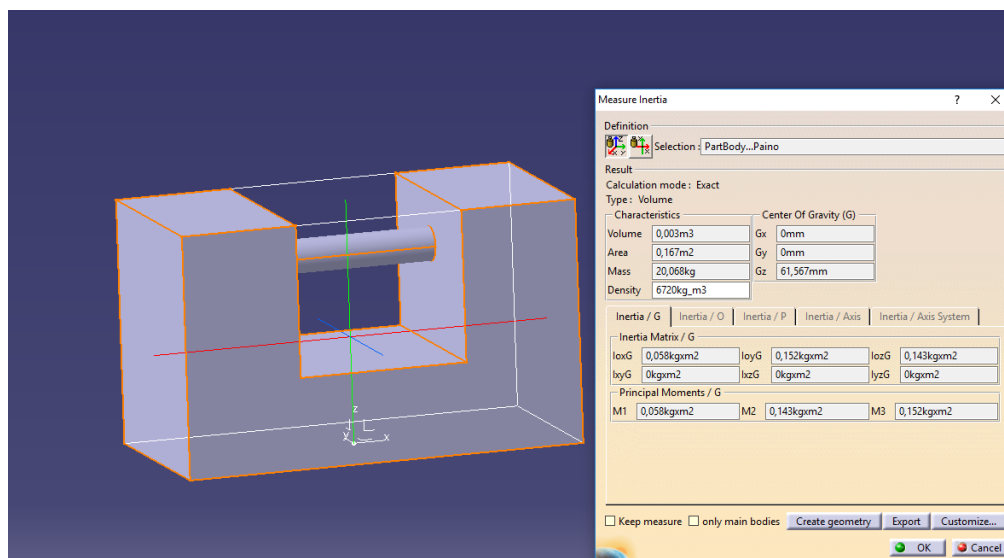
leja) kiertohitausmomentit VIMF-laitteella. Näiden tietojen pohjalta hankittiin mitattavaksi ja vuoden 1996 Chrysler Neon sekä vuoden 2004 Mercedes Benz A140.

5.2 Lisätty momentti ja lisäpainot

Tarkempi käsitys laitteen antamien tulosten tarkkuudesta päätettiin selvittää lisäämällä mittalaitteeseen painoja, joiden hitausmomentti olisi laskettavissa analyttisesti. Tällöin voitaisiin painojen kanssa saaduista mittaustuloksista vähentää tyhjälle laitteelle mitattu tulos ja vertailla saatua tulosta laskennallisen arvon kanssa. Käytettäviksi painoiksi valittiin Metropolian moottorilaboratoriossa käytetyn tehodynamometrin kalibrointiin tarkoitetut 20 kg:n painoiset kalibrointipainot (kuva 7). Yhden painon hitausmomentti ratkaistiin painon keskelle sijoitetun pystyakselin suhteen käsin laskukaavojen avulla sekä tietokoneavusteisesti Catia-3D-ohjelmaa käyttäen (kuva 8). Molemmilla laskutavoilla tulokseksi saatiin $0,143 \text{ kg} \times \text{m}^2$



Kuva 7. Lisäpainot



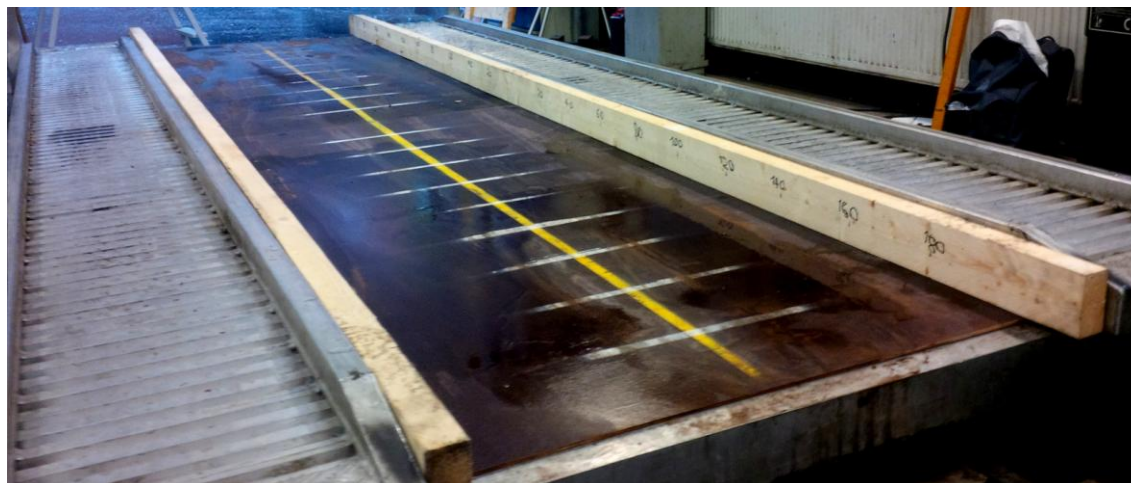
Kuva 8. Lisäpainon 3D-malli Catia-ohjelmassa.

5.3 Lisäpainojen alusta

Kappaleen hitausmomenttiin vaikuttaa suuresti sen etäisyys pyörimisakselista. Jos pyörimisakseli ei kulje kappaleen massakeskipisteen läpi, voidaan kappaleen hitausmomentin laskemiseen käyttää Steinerin sääntöä. Mittalaitteen tapauksessa pyörimisakseli sijaitsee laitteen keskipisteessä. Säännön avulla voitiin lisäpainoja sijoittaa laitteen päihin, missä niiden aiheuttama hitausmomentti on suurimmillaan. Jotta painojen ja keskipisteen välinen etäisyys saatiin määritettyä mahdollisimman tarkasti ja painojen sijaintia voitiin helposti muuttaa, päätettiin laitteen keskelle rakentaa vanerinen alusta.

Koska mitattavan auton hitausmomentin suuruuden ja systeemin kokonaismassan arvioitiin vaikuttavan virheen suuruuteen, päätettiin alusta rankentaa siten, että pelkkien painojen mittaamisen sijaan voitiin mittalaitteeseen samalla kertaa lastata myös auto. Tällöin pystyttäisiin lisäpainojen toteutuneen ja laskennallisen momentin suhteen lasketun virheen perusteella arvioida koko mittauksen virhe. Jotta painot saatiin mahtumaan auton alle, ei alustaa voinut tukea suoraan mittalaitteen ajosiltoihin, vaan vanerit päädyttiin kiinnittämään kahden lankun varaan, jotka puolestaan tuettiin molemmista päistään laitteen päätykappaleiden alapalkkeihin. Näin painojen alusta oli selvästi ajosiltojen alapuolella ja auton alle jäi tarpeeksi tilaa painojen siirtelyyn. Painojen sijoittamisen

helpottamiseksi alustaan maalattiin pituussuuntainen keskiviiva sekä poikittaiset mitta-
viivat 20 cm:n välein (kuva 9). Painot oli lisättävä pareittain samaan kohtaan mittalait-
teen eri päihin, jotta laitteen painopiste pysyi laitteen keskellä.



Kuva 9. Lisäpainojen alusta ja mitta-asteikko

5.4 Mittauksen valmistelut

Kun alusta oli saatu valmiiksi, voitiin mittaukset aloittaa. Mittauksia tehtiin useina eri päivinä sen perusteella, milloin autolaboratorio, avustaja sekä mitattava auto tai autot oli mahdollista järjestää samalle ajankohdalle. Ajankohdasta riippumatta kaikki mittaukset suoritettiin seuraavien vaiheiden mukaisesti:

- Auto punnittiin kulmapainovaaioilla.
- Auton pituussuuntaisen keskipisteen paikka määritettiin tasapainoyhtälöllä.
- Auto ajettiin mittalaitteeseen ja painopiste säädettiin mittalaitteen keskelle hyödyntäen mittalaitteen ajosiltaan kiinnitettyä mitta-asteikkoa.
- Mittalaitetta nostettiin autonostimella ja vaijerit kiinnitettiin laitteen päätykappaleisiin.
- Autonostin laskettiin, jolloin mittalaite jäi roikkumaan vaijerien varaan.
- Mittalaitteen vastakkaisia kulmia poikkeutettiin n. 15 cm sivusuunnassa eri suuntiin.

- Laite vapautettiin ja ajanotto käynnistettiin, kun laite oli heilahtanut yhden kokonaisen amplitudin.
- Jokaista mittausta varten suoritettiin viisi viiden amplitudin sarjaa, joista laskettiin yhden heilahdusajan keskiarvo.
- Jos laitteen havaittiin heilahtelevan epäkeskeisesti, tulos hylättiin.
- Ensimmäisenä mitattiin heilahdusaika pelkälle autolle, minkä jälkeen laitteeseen lisättiin mahdolliset lisäpainot.
- Kaikki autot olivat mittauksen aikana tyhjiä ja ne oli ennen mittausta tankattu täyteen tankissa hölskyvän polttoaineen vaikutuksen minimoimiseksi.

5.5 Mitattavat autot

Mittauksissa pyrittiin käyttämään mahdollisimman paljon erimallisia ja -tyyppisiä autoja. Autojen saatavuus sekä mittalaitteen mitat ja vaijerien kantokyky kuitenkin rajasivat mahdollisuuksia jonkin verran. Mittauksissa käytetyt automallit olivat Skoda Citigo 2015, Fiat Punto 2013, Suzuki SX4 2005, Nissan Leaf 2017, BMW M3 2005 ja Toyota MR2 2006. Lisäksi mitattiin Chrysler Neon 1996 sekä Mercedes Benz A140 2004, koska näille malleille oli saatavissa muualla kehittyneemmillä laitteistoilla mitattuja tuloksia.

6 Mittaustulokset

6.1 Vertailumittaukset

Vertailemalla Metropolian laitteella saatuja tuloksia Mercedes Benzin ja Chryslerin muualla tehtyjen mittausten tuloksiin, voitiin Chryslerille mitatun hitausmomentin todeta olevan 17 % ja Mercedeksen peräti 20 % suurempia kuin vertailuautoille ilmoitetut (taulukko 3). Vaikka mitattujen autojen massat poikkesivatkin jostain syystä jonkin verran vertailukohteistaan, oli tulosten ero siinä määrin huomattava, että niiden perusteella oli syytä epäillä laitteella mitattujen hitausmomenttien olevan todellisia arvoja suurempia. Näin ollen olisivat hitausmomentista laskettavat hitaussäde sekä indeksiluku nekin oletettavasti todellisuutta suurempia.

Taulukko 3. Vertailumittausten tulokset

Auto	Mercedes		Chrysler	
Mittaus	Metropolia	VIMM	Metropolia	VIMF
Massa (kg)	1115	1056	1212,5	1244
Hitausmomentti ($\text{kg}\times\text{m}^2$)	1655	1320	2285	1945

6.2 Lisäpainojen kanssa suoritettut mittaukset

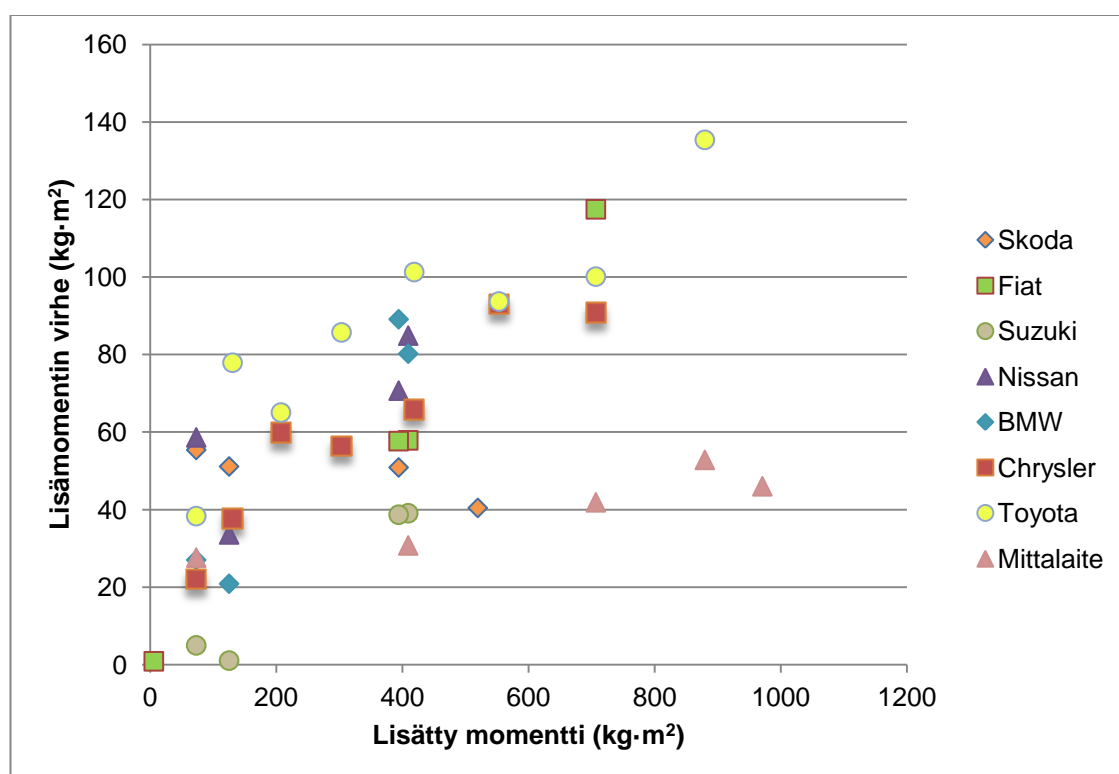
Jokaisen mittauksen aluksi auto mitattiin ilman painoja (taulukko 4), minkä jälkeen painoja asetettiin auton alle yhteen tai useampaan kohtaan, yleensä kolmen painon riveihin. Jokaiselle autolle tehtiin 4 - 7 mittausta erilaisilla painojen asettelulla. Mittauksia tehtiin myös ilman autoa lisäämällä painoja tyhjiin mittalaitteeseen.

Taulukko 4. Testiautoille ilman lisäpainoja mitatut hitausmomentti, hitaussäde ja indeksiluku

Auto	Hitausmomentti ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	Hiatussäde (m)	Indeksiluku
Skoda	1342	1,199	1,026
Fiat	1838	1,280	1,089
Suzuki	2129	1,309	1,129
Nissan	2554	1,292	0,941
BMW	2934	1,379	1,028
Toyota	1522	1,191	0,963
Chrysler	2285	1,372	1,101
Mercedes	1655	1,218	0,903

Painojen kanssa tehdyissä mittauksissa voitiin havaita hitausmomentin kasvavan loogisesti lisäpainojen määrän ja sijoittelun mukaan. Lisäpainojen massaa suurempi vaikutus oli painojen hitaussäteellä, joka kasvoi painojen ollessa kauempana laitteen keskipisteestä ja pieneni lähempänä keskipistettä. Heilahdusajan voitiin havaita kasvavan lineaarisesti hitaussäteen mukana. Lisäämällä painoja lähelle massakeskipistettä voitiin hitaussädettä ja heilahdusaikaa lyhentää ja samalla pienentää auton indeksilukua. Lisättäessä painoja auton hitaussäteen etäisyydelle keskipisteestä heilahdusaika pysyi samana kuin pelkän auton vaikka massa ja hitausmomentti suurenivat.

Mittalaitteen virhettä arvioitiin laskemalla lisäpainojen aiheuttaman lisämomentin ja painojen laskennallisen momentin erotus. Tuloksia tarkasteltaessa voitiin myös näiden mittausten perusteella todeta mittalaitteen antavan todelliseen hitausmomenttiin verrattuna liian suuren tuloksen; missään mittauksessa lisäpainojen tuottama lisämomentti ei ollut painojen laskennallista hitausmomenttia pienempi. Mitatun ja laskennallisen hitausmomentin erotuksesta lasketun virheen voitiin havaita kasvavan melko lineaarisesti lisätyn momentin suuruuden mukaan (kuva 10).



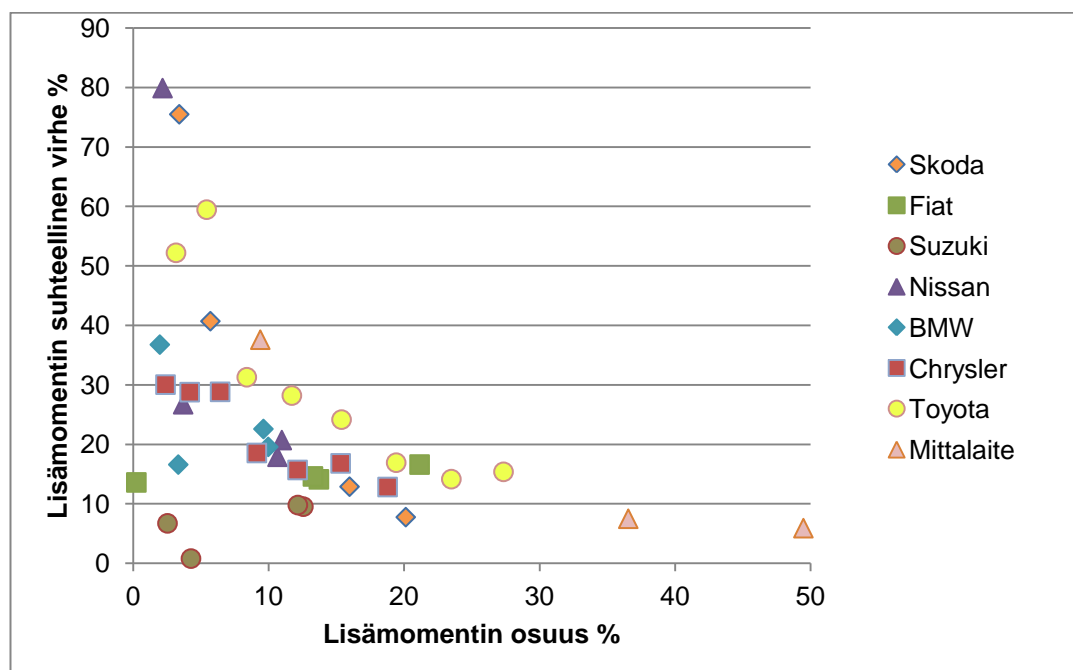
Kuva 10. Kuvaajassa lisämomentin virhe lisätyn laskennallisen lisämomentin suhteen

Lisäpainoihin perustuvan mittausmenetelmän vuoksi lisäpainojen määrä ja sijainti vaihteli koko ajan, minkä lisäksi mitattiin useampia erilaisia autoja. Tämän vuoksi pelkän mittausvirheen sijaan virheiden suuruutta oli helpompi vertailla virheestä ja laskennallisesta momentista lasketun suhteellisen eli prosentuaalisen virheen muodossa.

Prosentuaalisesti suurimmat sekä pienimmät virheet laskettiin pienellä lisämomentilla suoritetuille mittauksille. Eri autoille ja eri painoasetteluilla tehtyjen mittausten virheet poikkesivat suuresti toisistaan. Lisäpainojen aiheuttaman momentin osuuden kasvaes-

sa keskimääräinen virhe ja hajonta kuitenkin pienenevät merkittävästi. Suhteellisesti tarkimmat mittaukset tehtiinkin suurimmilla lisämomenteilla mitattaessa. Ilman autoa tehdyissä mittauksissa, jolloin lisäpainojen osuus koko systeemin hitausmomentista oli suurimmillaan yli 50 %, saatiin useammalle mittaukselle tulokseksi alle 10 %:n suhteellisia virheitä.

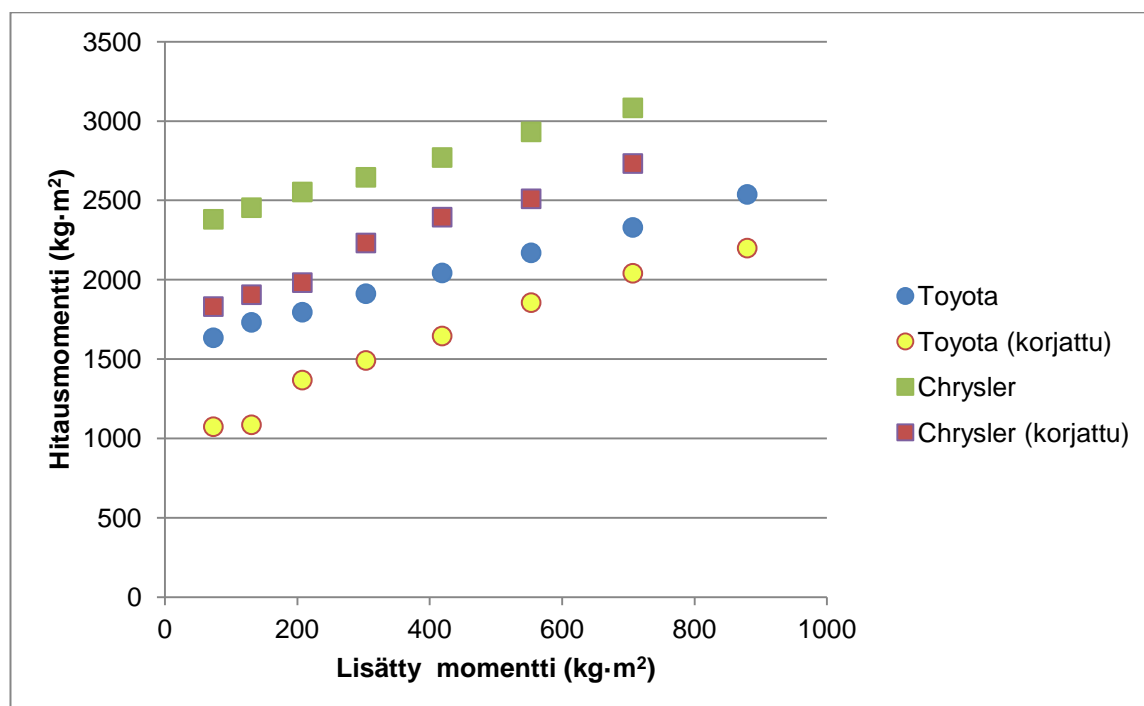
Pienillä lisämomenteilla suoritettujen mittausten suuri hajonta eri mittausten välillä voidaan selittää lisämomentin, josta virhe lasketaan, vähäisellä osuudella koko systeemin momenttiin nähden, jolloin lisämomentista mitattava virhe katoaa systeemin satunnaisvirheisiin. Prosentuaalisesta virheestä lisätyn hitausmomentin osuuden suhteen piirrettyssä kuvaajassa on havaittavissa selkeä suuntaus, jossa virhe pienenee lisätyn momentin kasvaessa (kuva 11). Lisätyn laskennallisen hitausmomentin ollessa yli 10 % koko systeemin hitausmomentista voidaan kuvaajasta havaita suhteellisen virheen asettuvan välille 10 - 20 %.



Kuva 11. Kuvaajassa lisämomentin suhteellinen virhe laskennallisen lisämomentin osuuden suhteen

Prosentuaalisen virheen avulla voitiin myös laskea, mikä olisi ollut mitatun auton hitausmomentti, jos koko mittauksen suhteellinen virhe oletetaan samaksi (kuva 12, taulukko 5). Tällä laskentatavalla saatiin usean mittauksen kohdalla varsin uskottavia tuloksia, mutta suhteellisen virheen suuruus kuitenkin vaihteli suuresti etenkin pienemmil-

lä lisämomenteilla mitattaessa. Myös ”korjatun” hitausmomentin pohjalta lasketut indeksiluvut olivat lähdemateriaalin perusteella jonkin verran liian pieniä. [9]



Kuva 12. Kuvaajassa Toyotan ja Chryslerin hitausmomentit ja korjatut hitausmomentit lisätyn laskennallisen lisämomentin suhteen

Taulukko 5. Suhteellisen virheen perusteella laskettu korjattu hitausmomentti, hitaussäde ja indeksiluku (Suhteellinen virhe laskettu keskiarvona mittauksista, joissa lisäpainojen osuus oli yli 10 %)

Auto	Hitausmomentti (kg·m ²)	Hitaussäde (m)	Indeksiluku
Skoda	1217	1,142	0,931
Fiat	1597	1,163	0,946
Suzuki	1941	1,250	1,030
Nissan	2141	1,183	0,789
BMW	2424	1,254	0,849
Toyota	1295	1,099	0,819
Chrysler	1985	1,279	0,957

7 Päätelmät

7.1 Mittalaitteen mittatarkkuus

Mittauksissa laitteen havaittiin reagoivan loogisesti massan ja hitaussäteen kasvuun ja hitaussäteen ja heilahdusajan suhteen pysyvän melko tarkalleen samana. Laitteella tehtyjen mittausten toistettavuus on suhteellisen korkea ja satunnaisvirheiden vaikutus ylipäättään pienehkö. Toistettavuus voi tosin kärsiä mittaustiimiä vaihdettaessa.

Mittausmenetelmänä lisäpainojen lisääminen laitteeseen toimi kohtalaisesti. Ongelmana menetelmässä oli lähinnä painojen pienehkö osuus koko systeemin hitausmomentista. Lisätyn momentin määrä vaikutti selkeästi lopputuloksen tarkkuuteen, ja varsinkin pienillä hitaussäteillä mitattaessa lasketut virheet olivat joissain mittauksissa hyvin suuria lisättyyn hitausmomenttiin nähden. Ensimmäisissä mittauksissa tätä ei osattu ennakoida ja laitteella tehtiin useampia mittauksia pienemmillä lisämomenteilla, joiden tulokset lopulta osoittautuivat melko hyödyttömiksi. Myöhemmissä mittauksissa informatiivisimmaksi menetelmäksi havaittiin painojen lisääminen suurempina erinä mittalaitteen päihin ja niiden siirtäminen mittaus kerrallaan lähemmäs painopistettä.

Lisätyn laskennallisen ja toteutuneen momentin erosta laskettu virhe kasvoi melko lineaarisesti mittauskohteen hitausmomentin mukana. Tulosten suhteellinen epätarkkuus oli kuitenkin suurinta mittakohteen hitausmomentin ollessa pieni ja parani momentin kasvaessa. Yhden auton kohdalla tämä on selitettävissä lisätyn momentin osuuden muuttumisesta, mutta suhteellinen virhe oli kuitenkin yleensä selvästi pienempi raskailta autoilla, vaikka lisäpainojen osuus olisi ollut sama. Näin ollen laitteen antamaa virhettä ei voi käsitellä täysin lineaarisena, vaan laitteen tarkkuus paranee jossain määrin kiihtyvästi mitattavan hitausmomentin kasvaessa.

Työssä tehtyjen mittausten perusteella mittalaitetta voi kutsua systemaattiselta tarkkuudeltaan lähinnä suuntaa-antavaksi. Autoja mitattaessa laite antoi n. 10 – 20 % todellista suuremman tuloksen riippuen lähinnä mitattauskohteen hitausmomentin suuruudesta. Tämä on linjassa Chryslerille ja Mercedes Benzille saatujen vertailutulosten kanssa. Myös koululla teetetyissä mittauksissa, joista aihe opinnäytetyölle syntyi, oli mittalaitteen antamia tuloksia epäilty nimenomaan liian suuriksi.

Laitteeseen rakennettu lisätuki paransi laitteen tarkkuutta työtä edeltäviin mittauksiin nähden n. 5 – 10 % mittaushetkestä riippuen. Tässäkin tilanteessa ero oli suurempi pienemmän hitausmomentin omaavien autojen kanssa. Ennen tuen lisäämistä auton massalla oli todennäköisesti isompi vaikutus lopputuloksen tarkkuuteen.

Tulosten oikeellisuudesta huolimatta kaikki laitteella tehdyt mittaukset ja tulokset ovat kuitenkin keskenään vertailukelpoisia. Laitteen paras käyttö lieneekin enemmän mittauksissa, jossa vertaillaan useamman auton ominaisuuksia kuin tarkan hitausmomentin selvittämiseen tähtäävissä mittauksissa.

7.2 Autojen ominaisuuksien vaikutus hitausmomenttiin

Tuloksia tarkastellessa voitiin niistä myös tehdä joitakin mielenkiintoisia havaintoja autojen eri ominaisuuksiin liittyen.

Pienimmät hitausmomentit mitattiin sarjan pienimmälle ja kevyimmälle autolle, Skoda Citigolle ja suurimmat taas BMW:lle, joka oli autoista raskain ja jossa oli isoin moottori. Lyhyin hitaussäde oli Toyotassa, mikä on ymmärrettävää, koska auto on keskimoottorinen.

Pienimmät indeksiluvut laskettiin Toyotalle, Mercedes Benzille, ja sähköauto Nissan Leafille. Mercedesen pientä lukua selittävät aivan auton nurkkiin sijoitetut pyörät, lyhyt hitaussäde sekä varsin tasainen painojako akselien kesken. Nissanin pienen indeksiluvun taas mahdollistaa se, ettei luku huomioi auton massaa, vaan ainoastaan sen jakautumisen. Auton keskiosaan sijoitettu akusto ja polttomoottoria kevyempi sähkömoottori lyhentävät auton hitaussädettä, ja pitkä akseliväli pidentää pyörien ja painopisteen väliin jääviä mittoja.

Suurimmat hitaussäteet ja indeksiluvut mitattiin BMW:lle, Chryslerille ja Suzukille. BMW ja Chrysler ovat porrasperäisiä, mikä pidentää autojen peränylitystä ja suurentaa näin hitaussädettä, pidentämättä juurikaan akseliväliä. Suzuki taas on nelivetoinen ja suurta lukua selventävät painopisteen sijainti lähellä etupyöriä, lyhyt akseliväli sekä nelivedon komponenttien sijainti kaukana painopisteestä. Huolimatta BMW:n eteen sijoitetusta raskaasta moottorista auton Indeksiluku oli kuitenkin lähempänä mittausten keskiluok-

kaa. Tämä on tehty mahdolliseksi pitkällä akselivälillä sekä painopisteen onnistuneella sijoittelulla.

Lähteet

- [1] Reinpell, Jörn; Stoll, Helmut & Betzler Jürgen. 2001. The Automotive Chassis. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- [2] Suvanto, Kari. 2010. Tekniikan Fysiikka 1. Helsinki: Edita Publishing Oy.
- [3] Valtanen, Esko. 2010. Tekniikan taulukkokirja. Mikkeli: Genesis-kirjat Oy.
- [4] Bastow, Donald; Howard, Geoffrey & Whitehead John. 2004. Car Suspension and Handling Fourth Edition. Warrendale: SAE International.
- [5] Center of Gravity and Inertia Testing. Verkkoaineisto. sealimited.com.
<<https://sealimited.com/capability/center-of-gravity-and-inertia>>. Luettu 16.4.2018.
- [6] Milliken, William & Milliken, Douglas. 2002. Chassis Design Principles and analysis. Bury St Edmunds: Professional Engineering Publishing Limited.
- [7] Smith, Carrol. 1978. Tune to Win. Rolling Hills Estates: Carrol Smith Consulting incorporated.
- [8] Beer, Ferdinand; Johnston, E. Russell; Mazurek, David; Cornwell, Philip & Eisenberg, Elliot. 2010. Vector Mechanics For Engineers Statics / Dynamics. New York: McGraw-Hill.
- [9] Blundell, Mike & Harty, Damian. 2004. The Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics. Oxford: Elsevier Ltd.
- [10] Korpilahti, Antti. 1991. Henkilöauton hitausmomentti ja sen kokeellinen määrittäminen. Opinnäytetyö. Helsingin teknillinen oppilaitos.
- [11] Hinrichsen, Peter. Trifilar Suspension Center Correction. Verkkoaineisto. Researchgate.net. <
https://www.researchgate.net/profile/Peter_Hinrichsen3/publication/303614060_Trifilar_Suspension_Centering_Correction/links/574a20b808ae5bf2e63f1cae/Trifilar-Suspension-Centering-Correction.pdf>. Luettu 15.4.2018.
- [12] Jardin, Matt. Improving Mass Moment of Inertia. Verkkoaineisto. Mathworks.com. https://www.mathworks.com/tagteam/62814_91810v00_MMOI_final.pdf. Haettu 2.4.2018.

Taulukoidut mittau tulokset

Skoda								
Auton mitat:			Auton Massat:			Mittalaitteen tiedot:		
akseliväli	2420		ev	274		Pituus (va	3,565	
Raideleveys	1410		eo	289		pituus (mi	2,025	
PP sijainti etuakselis	959,6999		tv	185		massa (mi	228	
			to	185		Putoamisl	9,82	
			Etuakseli	563		Heilahdus	3,2268	
			Takaakseli	370		J	679,926	
			yht	933				
			oik. puoli	474				
			vas. Puoli	459				
Mittaus	1	2	3	4	5			
Lisäpainojen määrä	0	240	120	240	120			
Painojen etäisyys kes	#DIV/0!	140	100	50	180			
J (systeemi)	2022,093	2582,22	2198,643	2150,789	2467,197			
J (auto + painot)	1342,167	1902,294	1518,717	1470,863	1787,271			
J Ero tyhjään (ilman p	0	560,1276	176,55	128,6966	445,1045			
J Lisäpainot (laskenn	0	519,732	125,466	73,332	394,266			
J Painoihin tullut virh	0	40,39563	51,08399	55,36457	50,83846			
% virhe	0	7,772396	40,7154	75,49851	12,89446			
Painojen osuus (%)	#DIV/0!	20,12733	5,70652	3,409539	15,98032			
Systeemin massa	1161	1401	1281	1401	1281			
Heilahdusaika (keski	2,466	2,5368	2,448	2,3152	2,5932			
k (auto + painot)	1,199396	1,273473	1,200948	1,119791	1,30281			
DI (auto + painot)	1,026472	1,157183	1,029131	0,89474	1,211113			
k (systeemi)	1,319728	1,357618	1,310095	1,239024	1,387802			
J korjattu (auto + pair	#DIV/0!	1765,104	1079,283	838,1059	1583,135			
J korjattu (auto)	#DIV/0!	1245,372	953,8165	764,7739	1188,869			
k korjattu (auto + pai	#DIV/0!	1,226694	1,012403	0,84528	1,226153			
k korjattu (auto)	#DIV/0!	1,155337	1,011094	0,905369	1,128824			
DI korjattu (auto)	#DIV/0!	0,952445	0,729467	0,58489	0,909232			

Suzuki							
Auton mitat:			Auton Massat:			Mittalaitteen tiedot:	
akseliväli	2500		ev	351,5	Pituus (va	3,565	
Raideleveys	1480		eo	377	pituus (mi	2,025	
PP sijainti etuakselis	1034,795		tv	251,5	massa (mi	228	
			to	263	Putoamisl	9,82	
			Etuakseli	728,5	Heilahdus	3,2268	
			Takaakseli	514,5	J	679,926	
			yht	1243			
			oik. puoli	640			
			vas. Puoli	603			
Mitta	1	2	3	4	5		
Lisäpainojen määrä	0	240	120	200	120		
Painojen etäisyys keski	#DIV/0!	50	100	140	180		
J (systeemi)	2808,716	2886,981	2935,189	3257,172	3241,635		
J (auto + painot)	2128,79	2207,055	2255,263	2577,246	2561,709		
J Ero tyhjään (ilman p	0	78,26428	126,4732	448,4561	432,9184		
J Lisäpainot (laskenn	0	73,332	125,466	409,43	394,266		
J Painoihin tullut virhe	0	4,932279	1,007172	39,02611	38,65238		
% virhe	#DIV/0!	6,725957	0,802745	9,531814	9,80363		
Painojen osuus (%)	0	2,540093	4,274545	12,57011	12,16257		
Systeemin massa	1471	1711	1591	1671	1591		
Heilahdusaika (keski	2,582	2,4272	2,538	2,6088	2,6672		
k (auto + painot)	1,308672	1,219933	1,286325	1,336426	1,370935		
DI (auto + painot)	1,129559	0,981565	1,091311	1,177977	1,239599		
k (systeemi)	1,381808	1,298963	1,35826	1,39615	1,427404		
J korjattu (auto + pair	#DIV/0!	2067,964	2237,304	2352,966	2332,991		
J korjattu (auto)	#DIV/0!	1994,632	2111,838	1943,536	1938,725		
k korjattu (auto + pai	#DIV/0!	1,180867	1,281193	1,276952	1,308304		
k korjattu (auto)	#DIV/0!	1,266764	1,303451	1,250434	1,248885		
DI korjattu (auto)	#DIV/0!	1,058374	1,120564	1,031261	1,028709		

[illegible]

Nissan								
Auton mitat:			Auton Massat:			Mittalaitteen tiedot:		
akseliväli	2698		ev	438,5		Pituus (va	3,565	
Raideleveys	1518		eo	446,5		pituus (mi	2,025	
PP sijainti etuakselis	1136,371		tv	317,5		massa (mi	228	
			to	326,5		Putoamisl	9,82	
			Etuakseli	885		Heilahdus	3,2268	
			Takaakseli	644		J	679,926	
			yht	1529				
			oik. puoli	773				
			vas. Puoli	756				
Mittaas	1	2	3	4	5			
Lisäpainojen määrä	0	120	240	120	200			
Painojen etäisyys kes	#DIV/0!	180	50	100	140			
J (systeemi)	3234,29	3699,217	3366,219	3393,318	3728,581			
J (auto + painot)	2554,364	3019,291	2686,293	2713,392	3048,655			
J Ero tyhjään (ilman p	0	464,9271	131,9293	159,0282	494,2912			
J Lisäpainot (laskenn	0	394,266	73,332	125,466	409,43			
J Painoihin tullut virh	0	70,66111	58,59727	33,56219	84,86121			
% virhe	#DIV/0!	17,92219	79,90681	26,75003	20,72667			
Painojen osuus (%)	0	10,65809	2,178468	3,697443	10,98085			
Systeemin massa	1757	1877	1997	1877	1957			
Heilahdusaika (keski	2,5352	2,6232	2,426	2,5124	2,5792			
k (auto + painot)	1,292521	1,353138	1,23229	1,282762	1,327873			
DI (auto + painot)	0,941407	1,031778	0,855712	0,927244	0,993608			
k (systeemi)	1,356762	1,403857	1,298321	1,34456	1,380309			
J korjattu (auto + pair	#DIV/0!	2560,409	1493,158	2140,743	2525,254			
J korjattu (auto)	#DIV/0!	2166,143	1419,826	2015,277	2115,824			
k korjattu (auto + pai	#DIV/0!	1,246076	0,918732	1,139389	1,208523			
k korjattu (auto)	#DIV/0!	1,190255	0,963638	1,148057	1,176349			
DI korjattu (auto)	#DIV/0!	0,798329	0,523275	0,742727	0,779783			

BMW									
Auton mitat:				Auton Massat:			Mittalaitteen tiedot:		
akseliväli	2722			ev	394,5		Pituus (va	3,565	
Raideleveys	1530			eo	387		pituus (mi	2,025	
PP sijainti etuakselista	1342,018			tv	368		massa (mi	228	
				to	392		Putoamisk	9,82	
				Etuakseli	781,5		Heilahdus	3,2268	
				Takaaksel	760		J	679,926	
				yht	1541,5				
				oik. puoli	779				
				vas. Puoli	762,5				
Mittaus	1	2	3	4	5				
Lisäpainojen määrä	0	120	240	120	200				
Painojen etäisyys keskeltä	#DIV/0!	180	50	100	140				
J (systeemi)	3613,982	4097,323	3714,283	3760,282	4103,6				
J (auto + painot)	2934,393	3417,734	3034,694	3080,693	3424,011				
J Ero tyhjään (ilman painoj)	0	483,3416	100,3011	146,3006	489,6184				
J Lisäpainot (laskennalline)	0	394,266	73,332	125,466	409,43				
J Painoihin tullut virhe	0	89,07565	26,96905	20,8346	80,18836				
% virhe	#DIV/0!	22,59278	36,77665	16,60578	19,58537				
Painojen osuus (%)	0	9,622526	1,974325	3,336611	9,977337				
Systeemin massa	1769,5	1889,5	2009,5	1889,5	1969,5				
Heilahdusaika (keskiarvo)	2,6704	2,7516	2,5404	2,636	2,6972				
k (auto + painot)	1,379709	1,434231	1,305162	1,361677	1,402187				
DI (auto + painot)	1,027881	1,110724	0,919808	1,00119	1,061646				
k (systeemi)	1,429117	1,472572	1,359545	1,410707	1,443459				
J korjattu (auto + painot)	#DIV/0!	2787,876	2218,722	2641,973	2863,236				
J korjattu (auto)	#DIV/0!	2393,61	2145,39	2516,507	2453,806				
k korjattu (auto + painot)	#DIV/0!	1,295348	1,115985	1,260997	1,282233				
k korjattu (auto)	#DIV/0!	1,246106	1,179727	1,277695	1,261677				
DI korjattu (auto)	#DIV/0!	0,838452	0,751503	0,881501	0,859538				

Chrysler								
Auton mitat:			Auton Massat:			Mittalaitteen tiedot:		
akseliväli	2678		ev	369		Pituus (va	3,565	
Raideleveys	1476		eo	367,5		pituus (mi	2,025	
PP sijainti etuakselista	1051,322		tv	235,5		massa (mi	228	
			to	240,5		Putoamisl	9,82	
			Etuakseli	736,5		Heilahdus	3,2268	
			Takaaksel	476		J	679,926	
			yht	1212,5				
			oik. puoli	608				
			vas. Puoli	604,5				
Mittaus	1	2	3	4	5	6	7	8
Lisäpainojen määrä	0	240	240	240	240	240	240	240
Painojen etäisyys keskeltä	#DIV/0!	170	150	130	110	90	70	50
J (systeemi)	2965,001	3762,665	3611,343	3449,712	3325,096	3232,639	3133,621	3060,368
J (auto + painot)	2285,075	3082,739	2931,417	2769,786	2645,17	2552,713	2453,695	2380,442
J Ero tyhjään (ilman painoja	0	797,6644	646,3421	484,7115	360,095	267,638	168,6199	95,36705
J Lisäpainot (laskennallinen	0	706,932	553,332	418,932	303,732	207,732	130,932	73,332
J Painoihin tullut virhe	0	90,73237	93,01008	65,77946	56,36295	59,906	37,68789	22,03505
% virhe	#DIV/0!	12,83467	16,80909	15,7017	18,5568	28,83812	28,78432	30,04834
Painojen osuus (%)	0	18,78807	15,32206	12,14397	9,134534	6,426081	4,178298	2,396183
Systeemin massa	1440,5	1680,5	1680,5	1680,5	1680,5	1680,5	1680,5	1680,5
Heilahdusaika (keskiarvo)	2,6808	2,796	2,7392	2,6772	2,6284	2,5916	2,5516	2,5216
k (auto + painot)	1,372807	1,456835	1,420629	1,380909	1,349487	1,325693	1,299727	1,280179
DI (auto + painot)	1,101999	1,241033	1,180114	1,115046	1,064878	1,027658	0,987795	0,958306
k (systeemi)	1,434682	1,496334	1,465936	1,432756	1,40664	1,386945	1,365539	1,349483
J korjattu (auto + painot)	#DIV/0!	2732,085	2509,579	2393,903	2231,141	1981,333	1905,274	1830,428
J korjattu (auto)	#DIV/0!	2025,153	1956,247	1974,971	1927,409	1773,601	1774,342	1757,096
k korjattu (auto + painot)	#DIV/0!	1,371479	1,314445	1,283794	1,239383	1,16794	1,145304	1,122583
k korjattu (auto)	#DIV/0!	1,292374	1,270197	1,276261	1,2608	1,209448	1,2097	1,203807
DI korjattu (auto)	#DIV/0!	0,97665	0,943419	0,952449	0,929512	0,855336	0,855694	0,847377

Toyota									
Auton mitat:			Auton Massat:			Mittalaitteen tiedot:			
akseliväli	2450		ev	234		Pituus (va	3,565		
Raideleveys	1490		eo	231		pituus (mi	2,025		
PP sijainti etuakselistasta	1387,267		tv	307		massa (mi	228		
			to	300		Putoamisi	9,82		
			Etuakseli	465		Heilahdus	3,2268		
			Takaaksel	607	J		679,926		
			yht	1072					
			oik. puoli	531					
			vas. Puoli	541					
Mittaust	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Lisäpainojen määrä	0	240	240	240	240	240	240	240	240
Painojen etäisyys keskeltä	#DIV/O!	190	170	150	130	110	90	70	50
J (systeemi)	2202,182	3217,276	3009,191	2849,167	2722,366	2591,604	2474,915	2410,974	2313,802
J (auto + painot)	1522,256	2537,35	2329,265	2169,241	2042,44	1911,678	1794,989	1731,048	1633,876
J Ero tyhjään (ilman painoja	0	1015,094	807,0092	646,9846	520,1838	389,4222	272,7326	208,7916	111,6195
J Lisäpainot (laskennalliner	0	879,732	706,932	553,332	418,932	303,732	207,732	130,932	73,332
J Painoihin tullut virhe	0	135,3618	100,0772	93,65258	101,2518	85,69016	65,00064	77,85957	38,28754
% virhe	#DIV/O!	15,3867	14,15655	16,92521	24,16903	28,21242	31,29063	59,46566	52,21123
Painojen osuus (%)	0	27,344	23,49243	19,42084	15,38853	11,71985	8,393501	5,430669	3,16933
Systeemin massa	1300	1540	1540	1540	1540	1540	1540	1540	1540
Heilahdusaika (keskiarvo)	2,432	2,7008	2,612	2,5416	2,4844	2,424	2,3688	2,338	2,2904
k (auto + painot)	1,191644	1,390667	1,332424	1,28584	1,247693	1,207092	1,169672	1,14865	1,115944
DI (auto + painot)	0,963183	1,311784	1,204206	1,121475	1,05592	0,988318	0,927991	0,894934	0,844697
k (systeemi)	1,301532	1,445386	1,397863	1,360187	1,329575	1,297251	1,26771	1,251226	1,225752
J korjattu (auto + painot)	#DIV/O!	2198,997	2040,413	1855,238	1644,887	1491,024	1367,187	1085,53	1073,426
J korjattu (auto)	#DIV/O!	1319,265	1333,481	1301,906	1225,955	1187,292	1159,455	954,598	1000,094
k korjattu (auto + painot)	#DIV/O!	1,294629	1,247074	1,18914	1,119698	1,066045	1,020815	0,909607	0,904522
k korjattu (auto)	#DIV/O!	1,10935	1,115311	1,102027	1,069399	1,052401	1,039991	0,943654	0,96588
DI korjattu (auto)	#DIV/O!	0,834743	0,843738	0,82376	0,775703	0,75124	0,733626	0,604006	0,632793

Mercedes								
Auton mitat:			Auton Massat:					
akseliväli	2593		ev	326				
Raideleveys			eo	315,5				
PP sijainti etuakselistasta	1101,153		tv	226				
			to	247,5				
			Etuakseli	641,5				
			Takaakseli	473,5				
			yht	1115				
			oik. puoli	563				
			vas. Puoli	552				
Mittaus	1	2	3	4	5			
Tunkit	kyllä	kyllä	kyllä	ei	ei			
heilahdukset	0-5	0-10	5-10	0-5	0-10			
J (systeemi)	2274,112	2299,641	2325,316	2285,206	2297,034			
J (auto + painot)	1644,22	1669,749	1695,424	1655,314	1667,142			
J Ero tyhjään (ilman painoja)	0	0	0	0	0			
J Lisäpainot (laskennalliset)	0	0	0	0	0			
J Painoihin tullut virhe	0	0	0	0	0			
% virhe	0	0	0	0	0			
Painojen osuus (%)	0	0	0	0	0			
Systeemin massa	1290,5	1290,5	1290,5	1290,5	1290,5			
Heilahdusaika (keskiarvo)	2,480479	2,494363	2,508249	2,486522	2,492949			
k (auto + painot)	1,214346	1,223737	1,23311	1,218436	1,222782			
DI (auto + painot)	0,897662	0,9116	0,925617	0,903719	0,910177			
k (systeemi)	1,327477	1,334907	1,342338	1,330711	1,33415			
J korjattu (auto + painot)	0	0	0	0	0			
J korjattu (auto)	0	0	0	0	0			
k korjattu (auto + painot)	0	0	0	0	0			
k korjattu (auto)	0	0	0	0	0			
DI korjattu (auto)	0	0	0	0	0			

Mittalaite							
						Mittalaitteen tiedot:	
						Pituus (va	3,565
						pituus (mi	2,025
						massa (mi	228
						Putoamisl	9,82
						Heilahdus	3,2268
						J	679,926
Mittaustulos:	1	2	3	4	5	6	
Lisäpainojen määrä	0	240	240	200	240	240	
Painojen etäisyys keskeltä (mm)	0	170	50	140	190	200	
J (systeemi)	679,926	1428,702	780,8348	1120,07	1612,452	1696,838	
J (auto + painot)	679,926	748,7763	100,9088	440,1444	932,5265	1016,912	
J Ero tyhjään (ilman painoja)	0	748,7763	100,9088	440,1444	932,5265	1016,912	
J Lisäpainot (laskennallinen)	0	706,932	73,332	409,43	879,732	970,932	
J Painoihin tullut virhe	0	41,84425	27,57679	30,71437	52,79447	45,98029	
% virhe	0	5,919134	37,6054	7,501738	6,0012	4,735686	
Painojen osuus (%)	0	49,48071	9,391487	36,55395	54,55863	57,22007	
Systeemien massa	228	468	468	428	468	468	
Heilahdusaika (keskiarvo)	3,2268	3,2648	2,4136	3,0228	3,4684	3,558	
k (auto + painot)	1,726885	1,766324	0,648424	1,483483	1,971174	2,05843	
Dl (auto + painot)	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
k (systeemi)	1,726885	1,747221	1,291685	1,61771	1,856182	1,904133	
J korjattu (auto + painot)		706,932	73,332	409,43	879,732	970,932	
J korjattu (auto)	0	0	0	0	0	0	
k korjattu (auto + painot)	#DIV/0!	1,71626	0,552766	1,430786	1,914563	2,011355	
k korjattu (auto)	0	0	0	0	0	0	
Dl korjattu (auto)	0	0	0	0	0	0	